

This Page Is Inserted by IFW Operations  
and is not a part of the Official Record

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning documents *will not* correct images,  
please do not report the images to the  
Image Problem Mailbox.**

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**



DE4129796

Biblio

Desc

Claims

Page 1

Drawing

esp@cenet

**Stripe-projection contactless measurement of object surface s - involves phase comparison of distorted lines on object surface, stored reference values, grating periodicity and geometrical constants of equipment.**

Patent Number: DE4129796  
Publication date: 1993-04-01  
Inventor(s): HOF ALBRECHT DR (DE); HANSSEN ADALBERT (DE); KUECHEL MICHAEL DR (DE)  
Applicant(s):: ZEISS CARL FA (DE)  
Requested Patent: ☒ DE4129796  
Application Number: DE19914129796 19910909  
Priority Number(s): DE19914129796 19910909; DE19904007500 19900309  
IPC Classification: G01B11/02 ; G01B11/28 ; G01B11/30 ; G01B21/02 ; G01B21/28 ; G01B21/30  
EC Classification: G01B11/24F, G01B11/25G  
Equivalents:

#### Abstract

Stripe patterns are projected in succession, e.g. in a TDM fashion, on to the object surface (O) and imaged by a camera (K) with an image-processing computer. To increase the range of measurement along the camera axis, at least two beat frequencies are evaluated with very different effective wavelengths. One frequency is generated by imaging of the differences between measured stripe phases and a reference phase stored in a memory. Two projection gratings (G1,G2) and projectors (P1,P2) are sited at different distances from the camera.  
**ADVANTAGE** - High resolution and unambiguity of measurements are maintained with less complex appts.

Data supplied from the esp@cenet database - I2

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 41 29 796 A 1**

⑳ Aktenzeichen: P 41 29 796.2  
㉑ Anmeldetag: 9. 9. 91  
㉒ Offenlegungstag: 1. 4. 93

⑤1 Int. Cl. 5:  
**G 01 B 11/02**  
G 01 B 11/28  
G 01 B 11/30  
G 01 B 21/02  
G 01 B 21/28  
G 01 B 21/30

DE 41 29 796 A 1

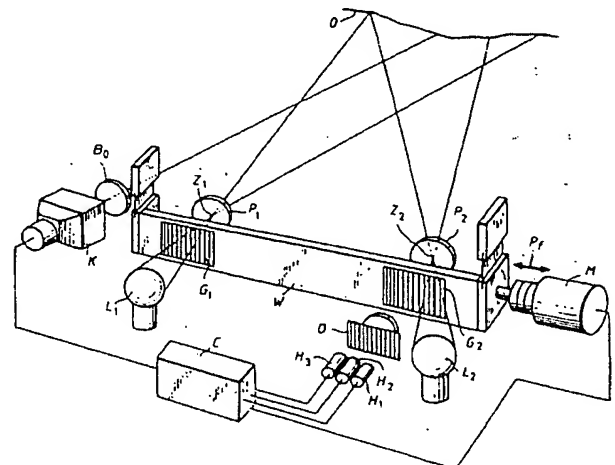
⑦1 Anmelder:  
Fa. Carl Zeiss, 7920 Heidenheim, DE

⑥1 Zusatz zu: EP 91 1027365

⑦2 Erfinder:  
Küchel, Michael, Dr., 7082 Oberkochen, DE; Hanßen,  
Adalbert, 7923 Königsbronn, DE; Hof, Albrecht, Dr.,  
7080 Aalen, DE

⑤4 Verfahren und Vorrichtung zur berührungslosen Vermessung von Objektoberflächen

⑤7 Auf das zu vermessende Objekt (O) werden z. B. im Zeitmultiplex nacheinander mehrere Streifenmuster projiziert und es werden die Phasen der vom Objekt verzerrten Streifenmuster an den Bildpunkten in einem der Kamera (K) nachgeschalteten Bildverarbeitungsrechner ermittelt. Zur Vergrößerung des Meßbereichs in Richtung der Kameraachse (z) werden mindestens zwei Schwebungsfrequenzen mit sehr unterschiedlicher effektiver Wellenlänge ausgewertet. Mindestens eine Schwebungsfrequenz wird durch Bildung der Differenzen zwischen den gemessenen Streifenphasen ( $s_1$ ,  $s_2$ ) und einem Speicher abgelegten Sollphasen (Ref<sub>1</sub>, Ref<sub>2</sub>) erzeugt. Diese Sollphasen können anhand der Geometrie des optischen Aufbaus und den Meßwerten einer Referenzmessung berechnet sein. Dadurch erhält man bereits mit zwei Projektionsgittern ( $G_1$ ,  $G_2$ ) einen großen Eindeutigkeitsbereich bei gleichzeitig hoher Meßauflösung.



DE 41 29 796 A 1

## Beschreibung

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren nach dem Oberbegriff der Ansprüche 1 und 2 sowie Vorrichtungen zur Durchführung des Verfahrens.

Derartige Meßverfahren und zugehörige Meßvorrichtungen sind in der europäischen Anmeldung mit dem Aktenzeichen 91 102 736.5 (Hauptanmeldung) beschrieben. Um die Objektoberfläche in einem großen Eindeutigkeitsbereich zu vermessen, werden hier entweder drei Streifenmuster gleicher Periode, aus unterschiedlichen Richtungen oder zwei mal zwei Streifenmuster mit paarweise gleicher Periode projiziert. In einem Auswerterechner werden dann Schwebungen zwischen den bei Projektion verschiedener Streifenmuster aufgenommenen Bildern berechnet. Durch die Erzeugung zweier Schwebungsfrequenzen mit unterschiedlichen effektiven Wellenlängen erlaubt das Verfahren hochaufgelöste Messungen in einem großen Eindeutigkeitsbereich. Dafür sind hier mindestens drei großflächige und hochgenau gefertigte Gitter erforderlich.

Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, das in der Hauptanmeldung beschriebene Meßverfahren und die zugehörigen Meßvorrichtungen dahingehend weiterzubilden, daß bei gleicher Auflösung und gleich großem Eindeutigkeitsbereich ein geringerer gerätetechnischer Aufwand erforderlich ist.

Diese Aufgabe wird durch die kennzeichnenden Merkmale der Ansprüche 1, 2, 6 und 7 gelöst.

Erfindungsgemäß wird somit mindestens eine Schwebungsfrequenz durch Differenz zwischen den gemessenen Streifenphasen und in einem Bildspeicher abgelegten Referenzphasen (z. B. die Sollphasen aus der Gerätegeometrie) berechnet. Es sind daher lediglich zwei Projektoren mit jeweils einem Projektionsgitter (Sinus- oder Ronchigitter) erforderlich. Die Periodizität der Projektionsgitter ist vorzugsweise gleich.

Die für die Berechnung der Schwebungsfrequenzen erforderlichen Sollphasen können entweder aus den geometrischen Gerätekonzanten (Periodizität der Gitter, Abstand der Projektionsgitter von den Projektionszentren und Abstand des Kamerasensors vom Hauptpunkt des Kameraobjektives) berechnet werden. In einem bevorzugten Ausführungsbeispiel werden die Sollphasen bei einer Messung an einer Oberfläche bekannter Geometrie, z. B. einer Ebene parallel zu den Projektionszentren unter Berücksichtigung der Gerätegeometrie gewonnen. Dazu werden in den entsprechenden Bildspeichern die Differenzen zwischen den Meßwerten bei der Referenzmessung und den theoretischen Sollphasen abgelegt. Die durch fehlerhafte Gitterjustierung verursachten Meßfehler haben dann keinen oder nur einen geringen Einfluß auf das Meßergebnis.

Zwar werden auch bei den in der Hauptanmeldung beschriebenen Meßvorrichtungen Phasenwerte von Referenzmessungen berücksichtigt. Sie dienen dort jedoch nicht zur Erzeugung von Schwebungsfrequenzen. Diese Schwebungsfrequenzen werden vielmehr aus den Streifenphasen zweier auf die Objektoberfläche projizierter Streifenmuster berechnet, wozu auch im Auswerterechner zusätzliche Bauteile erforderlich sind.

Bei den erfindungsgemäßen Auswerteverfahren kann der Auswerterechner dagegen vereinfacht sein, da die selben Bausteine, die bei der Auswertung zur Berücksichtigung der Referenzmessungen verwendet werden, gleichzeitig auch zur Bildung der Schwebungsphasen dienen.

Bei einem vorteilhaften Ausführungsbeispiel werden beide Schwebungsfrequenzen als Differenz zwischen den gemessenen Streifenphasen und den Sollphasen oder den Referenzphasen erzeugt.

Geeignete Meßvorrichtungen zur Durchführung der Verfahren haben zwei Streifenprojektoren und eine Kamera, die zwischen den Projektoren angeordnet ist. Zur Erzeugung der Schwebungsfrequenzen mit unterschiedlichen effektiven Wellenlängen haben die Projektionszentren der Projektoren quer zur Streifenrichtung der Gitter unterschiedliche Abstände von der Kamera. Der Unterschied der Abstände ist dabei wesentlich kleiner als die Abstände der Projektoren von der Kamera. Die Projektionsgitter haben vorzugsweise gleiche Periodizität, und die Projektionszentren sind vorzugsweise in einer Ebene mit der Hauptebene des Kameraobjektives angeordnet.

Bei einem besonders bevorzugten Ausführungsbeispiel sind jedoch beide Projektoren auf der selben Seite der Kamera angeordnet. Der Abstand eines Projektors von der Kamera ist dabei sehr viel größer als der Abstand des anderen Projektors. Bei dieser Anordnung sind Glanzlichtprobleme bei der Vermessung von technischen Oberflächen weitgehend vermieden da die Beleuchtung der Oberflächen von der Kamera aus betrachtet unter annähernd gleichen Winkeln erfolgt.

Zur Ausmittelung von Fehlern der Projektionsgitter oder zur Berechnung der Streifenphasen mit Phasenschiebealgorithmen sind die Projektionsgitter auf einem gemeinsamen, quer zur Streifenrichtung in der Gitterebene verschiebbaren Träger angeordnet. Es können daher mehrere Messungen bei unterschiedlichen Gitterpositionen durchgeführt werden. Die Verschiebung der Gitter sollte um kontrollierbare Beträge erfolgen und bei der Auswertung berücksichtigt werden.

Für die Kontrolle der Verschiebung ist vorzugsweise ein inkrementales Gittermeßsystem vorgesehen. Ein solches inkrementales Meßsystem ist beispielsweise aus der DE-OS 23 16 248 bekannt, so daß hierauf an dieser Stelle nicht näher eingegangen zu werden braucht. Wesentlich ist jedoch, daß ein Randbereich eines der Projektionsgitter gleichzeitig als Maßstabgitter für das inkrementale Meßsystem dienen kann.

Im folgenden werden Einzelheiten der Erfindung anhand des in den Zeichnungen dargestellten Ausführungsbeispiels näher erläutert. Im einzelnen zeigen:

Fig. 1 ist eine Prinzipskizze, die den optisch-geometrischen Aufbau der Erfindung zeigt.

Fig. 2 ist eine perspektivische Darstellung der wesentlichen Bauteile der in Fig. 1 skizzierten Vorrichtung.

Fig. 3a und 3b sind Teilschaltbilder des zur Signalauswertung der Vorrichtung nach Fig. 1 und 2 benutzten Auswerterechners.

In der schematischen Darstellung nach Fig. 1 ist ein Aufbau dargestellt, der im wesentlichen aus zwei Projektoren mit den Projektionsoptiken ( $P_1$ ,  $P_2$ ) und zwei Gittern ( $G_1$ ,  $G_2$ ) mit jeweils gleicher Gitterperiode besteht, die im Abstand ( $a$ ) hinter den Projektionsoptiken ( $P_1$ ,  $P_2$ ) angeordnet sind. Die Linien auf den Gittern verlaufen in  $y$ -Richtung, d. h. senkrecht zur Zeichenebene. Der Kamerasensor ist mit ( $K$ ) bezeichnet und befindet

sich hinter dem Beobachtungsobjektiv (Bo). Während der zweite Projektor (P<sub>2</sub>) im großen Abstand quer zur Streifenrichtung von der Kamera angeordnet ist, ist der Abstand des ersten Projektors (P<sub>1</sub>) zu (Bo) wesentlich kleiner. Der Nullpunkt des Koordinatensystems liegt im meßobjektseitigen Hauptpunkt von (Bo). Jeder der Projektoren definiert zusammen mit der Kamera einen Satz von Ebenen konstanter Phasendifferenz, wie unten ausgeführt wird. Beiden Sätzen können unterschiedliche effektive Wellenlängen (L<sub>eff</sub>) in z-Richtung zugeordnet werden. Die effektive Wellenlänge (L<sub>eff</sub>) wird durch die Gitterkonstante der Gitter (G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub>) und den Lagen der Projektionszentren (Z<sub>1</sub>, Z<sub>2</sub>) bestimmt. Nachfolgend werden Formeln abgeleitet, aus denen sich die Objektkoordinaten (x), (y) und (z) aus den von den zwei Projektoren (P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>) projizierten Streifenmustern für die einzelnen Punkte der Objektoberfläche berechnen lassen. Hierfür ist vorausgesetzt, daß sich die Projektionszentren (Z<sub>1</sub>, Z<sub>2</sub>) der Projektionsobjektive auf einer sich in x-Richtung erstreckenden Geraden liegen und die Gitter (G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub>) im gleichen Abstand (a) hinter diesen Geraden angeordnet sind. Die Gitter sind beispielsweise wie in Fig. 2 skizziert auf einem gemeinsamen Träger (W) aus Glas oder einem Material mit geringem thermischen Ausdehnungskoeffizienten — wie z. B. Zerodur — angeordnet und können gemeinsam relativ zur Kamera (K) in Richtung der Geraden x mit Hilfe einer Federwippe spielfrei bewegt werden. Die photoempfindliche Fläche der Kamera, d. h. der CCD-Sensor ist im Abstand (a<sub>k</sub>) hinter dem Beobachtungsobjektiv (Bo) angeordnet.

Durch den beschriebenen Aufbau ist die Geometrie des Meßgerätes im wesentlichen bestimmt. Die z. B. an einem exemplarischen Punkt (x, y = 0, z) projizierten Gitterorte (x<sub>p1</sub>, x<sub>p2</sub>) werden mit der Videokamera (K) beobachtet.

Durch Betrachten ähnlicher Dreiecke erhält man für die Projektoren

$$\frac{x_{p1} - x_{op1}}{a} = \frac{x - x_{op1}}{z} \quad (1)$$

$$\frac{x_{p2} - x_{op2}}{a} = \frac{x - x_{op2}}{z} \quad (2)$$

und für die Kamera

$$\frac{x_k}{a_k} = \frac{x}{z} \quad (3)$$

Die Kombination der Kameragleichung (3) mit den Projektionsgleichungen (1)–(2) liefert

$$z = \frac{a x_{op1}}{x_k \frac{a}{a_k} - (x_{p1} - x_{op1})} = \frac{a x_{op1}}{x_k \frac{a}{a_k} - (n_1 + s_1) P} \quad (4)$$

$$z = \frac{a x_{op2}}{x_k \frac{a}{a_k} - (x_{p2} - x_{op2})} = \frac{a x_{op2}}{x_k \frac{a}{a_k} - (n_2 + s_2) P} \quad (5)$$

wobei die Differenzen (x<sub>opi</sub> - x<sub>pi</sub>, i = 1, 2) als das (n<sub>i</sub> + s<sub>i</sub>)fache der Streifenperiode (P) mit (n<sub>i</sub>) als einem Element der natürlichen Zahlen und (s<sub>i</sub> < 1) ausgedrückt sind.

Der Term (x<sub>k</sub> a/a<sub>k</sub>) stellt die Sollphase dar. Man kann diesen Term (x<sub>k</sub> a/a<sub>k</sub>) in den Gleichungen (4) und (5) ebenfalls als Ordnung und Restphase eines gedachten Streifenmusters auffassen:

$$(x_k a)/a_k = (n_0 + s_0)P \text{ mit } n_0 \text{ ganzzahlig und } 0 \leq s_0 < 1$$

Aus den Gleichungen (4) und (5) erhält man so

$$z = \frac{a x_{op1}}{(n_0 - n_1 + s_0 - s_1)P} \quad (10)$$

und

$$z = \frac{a x_{op2}}{(n_0 - n_2 + s_0 - s_2)P} \quad (11)$$

So, wie die Schwebungen mit einem nur gedachten Kameragitter gebildet werden, kann man auch Differenzen zwischen den Streifenphasen zweier Projektoren bilden, also aus den Gleichungen (4) und (5):

$$z = \frac{a (x_{op1} - x_{op2})}{(n_1 - n_2 + s_1 - s_2)P} \quad (12)$$

Faßt man nun die Nenner in den Gleichungen (10) bis (12) in einem Ordnungsterm  $N_i$  und eine Restphase  $\Delta_i$  mit  $0 \leq \Delta_i < 1$  zusammen, so erhält man:

$$z = K_i / (N_i \Delta_i) \quad (13)$$

mit

$\text{entier}(x) :=$  größte ganze Zahl kleiner gleich  $x$

$\text{mod}(x, y) := x - (y \text{ entier}(x/y))$  für  $y > 0$

$$K_1 = x_{op1} a/P$$

$$K_2 = x_{op2} a/P$$

$$K_3 = (x_{op1} - x_{op2}) a/P$$

$$\Delta_1 = \text{mod}(s_0 - s_1, 1)$$

$$\Delta_2 = \text{mod}(s_0 - s_2, 1)$$

$$\Delta_3 = \text{mod}(s_1 - s_2, 1)$$

$N_i$  erhält man aus den bei der Berechnung der  $\Delta_i$  abfallenden ganzzahligen Anteilen, z. B.

$$N_1 = \text{entier}(n_0 - n_1 + s_0 - s_1)$$

Die Formel (13) beschreibt Ebenen konstanter Phasendifferenz ( $N_i + \Delta_i$ ), die parallel zur  $x/y$ -Ebene liegen. Zur Messung müssen zwei ganze Zahlen ( $N_i$ ) und zwei Bruchteile ( $\Delta_i$ ) bestimmt werden. Den Flächen gleicher Phasendifferenz nach Gleichung (13) lassen sich unterschiedliche effektive Wellenlängen ( $L_{eff}$ ) der Phasendifferenzen zuordnen.

Zur vollständigen Bestimmung der Koordinaten ( $x$ ,  $y$  und  $z$ ) eines Bildpunktes werden die Lateralkoordinaten ( $x$ ) und ( $y$ ) über das Abbildungsgesetz mit

$$x = \frac{x_k}{a_k} z \quad (16)$$

$$y = \frac{y_k}{a_k} z \quad (17)$$

berechnet.

Zur Auswertung werden die von den Projektoren ( $P_1, P_2$ ) in Zeitmultiplexbetrieb projizierten Streifenmuster durch das Objektiv ( $Bo$ ) von der Kamera ( $K$ ) aufgenommen und getrennt in verschiedene Bildspeicher eingelesen. Die Berechnung der Objektkoordinaten ( $x$ ,  $y$  und  $z$ ) nach den angegebenen Formeln geschieht dann — wie nachstehend anhand von Fig. 3a und 3b beschrieben — in einem hardwaremäßig aufgebauten Bildverarbeitungsrechner. Dieser Rechner verarbeitet die Bilddaten in Videoechtzeit. Er ist hierzu in Form einer Pipelinestruktur auch mit teilweise parallelen Datenpfaden aufgebaut und wird von einem Host-Rechner mit bekannter von Neumann-Struktur, d. h. beispielsweise einem kommerziell erhältlichen Prozeßrechner gesteuert. Für die weitere Beschreibung des Auswerterechners wird auf das Blockschaltbild Fig. 3a und 3b bezug genommen. Dort sind die drei unterschiedlichen Funktionsbaugruppen mit (A), (B) und (C) bezeichnet. Die Funktionsbaugruppe (A) stellt die Schnittstelle zu den externen Sensoren bzw. zu steuernden Teilen der Vorrichtung dar. Sie enthält einen Analog/Digitalwandler (12), der das Signal der Kamera ( $K$ ) in Videoechtzeit digitalisiert. Der Verstärkungsfaktor ist hierbei abhängig vom Ausgangssignal einer Photodiode (13) gesteuert, so daß das Videosignal an unterschiedliche Helligkeitsverhältnisse bzw. unterschiedliche Energien der als Blitzlampen ausgebildeten Lichtquellen ( $L_1, L_2$ ) (siehe Fig. 1 und 2) angepaßt werden kann, die zur Beleuchtung der Gitter ( $G_1, G_2$ ) dienen. Zur Ansteuerung der Blitzlampen ( $L_1, L_2$ ) enthält die Schnittstellenkarte (A) eine Triggerschaltung (31), die mit der Kamera ( $K$ ) synchronisiert ist. Die Schnittstellenkarte (A) enthält außerdem die Steuerelektronik (32) für den Motor ( $M$ ), mit dem der Träger ( $W$ ) um definierte Weginkremente verstellt werden kann. Die Abfolge der Blitze wird entsprechend einem festgelegten Meßprogramm des in der Fig. 3 nicht dargestellten konventionellen Host-Rechners gesteuert. Dies ist durch die beiden Pfeile "Host" symbolisiert, die auch an anderer Stelle in der Schaltung nach Fig. 3a und 3b auftauchen.

Das digitalisierte Videosignal, das den A/D-Wandler (12) verläßt, ist den Eingängen zweier parallel geschalteter Konvolutionsbausteine (14a), (14b) in der Funktionsbaugruppe (B) zugeführt. Diese beiden Bausteine (14a) und (14b) führen eine Faltungsoperation durch, um den Sinus bzw. Kosinus der Streifenphase an den einzelnen Bildpunkten aus dem Intensitätsverlauf des Signals in der näheren Umgebung der Bildpunkte zu bestimmen. Entsprechende Algorithmen sind beispielsweise im "Optical Engineering", Vol. 23, No. 4 (1984), Seiten 391 — 395 oder in der älteren deutschen Anmeldung P 40 14 019.9 der Anmelderin beschrieben. Die Ausgänge der Bausteine (14a), (14b) sind einer Schaltung (15) zugeführt, in der die Streifenphase unter Berücksichtigung der Vorzeichen aus dem Sinus und Kosinus berechnet wird (z. B. in ganzen Vielfachen von  $1/256$ , also als 8 Bit-Zahlen ohne Vorzeichen). Hierzu ist in einer der Schaltung (15) zugeordneten Tabelle der entsprechend skalierte Arcustangens abgelegt. Gleichzeitig werden auf der Basis der in der Schaltung (15) berechneten Phasenwerte ungültige Meßwerte maskiert. Ungültige Meßwerte treten entweder bei zu hoher oder bei zu geringer Beleuchtungsintensität auf; die Entscheidung wird anhand zweier Grenzwerte getroffen. Die Maske, die diese Bildbereiche maskiert, wird in einem parallel zum Meßdatenstrom in dem mit (C) bezeichneten Schaltungsteil erzeugt, wie nachfolgend noch beschrieben wird.

Der Ausgang der Schaltung (15) ist über eine Berechnungsstufe (16) mit der nachfolgend beschriebenen Mittelungsstufe (s. Fig. 3b) verbunden. In der Berechnungsstufe (16) werden von den Phasenmeßwerten  $s_1$  für den 1. Projektor und  $s_2$  für den 2. Projektor zugehörige Referenzwerte ( $Ref_1$  und  $Ref_2$ ) subtrahiert. In diesem Ausführungsbeispiel, in dem alle Phasenwerte als ganze Vielfache von  $1/256$  ausgedrückt sind, ist die Subtrak-



tion modulo 256. Die Referenzwerte  $Ref_1$  und  $Ref_2$  werden bei einer Referenzmessung ermittelt und vom Rechner in die RAM-Speicher (18a, 18b) eingeschrieben. Bei idealem Aufbau handelt es sich dabei um die Werte  $(-256 \cdot x_k \cdot (a_k \cdot P)) \text{ modulo } 256$ , die Phase auf einem gedachten Auswertegitter auf der Kamera.

Für Abweichungen des Gerätes von der Sollgeometrie weichen auch die Referenzphasen von den Sollwerten ab. Für die Referenzmessung, die in einer wohldefinierten Stellung mit einer bekannten, ebenen Referenzfläche ausgeführt wird, kennt man die Sollphasen. Es werden daher die Differenzen zwischen den Phasenmeßwerten der Referenzmessung und den Sollphasen in den Bildspeichern (18a, 18b) abgespeichert. Nachfolgende Messungen in dieser Stellung liefern gerade die Sollphase.

Auf die Recheneinheit (16) folgt eine Summationsstufe (S) (siehe Fig. 3b), die aus einer Recheneinheit (20) und zwei RAM-Speichern (21a), (21b) besteht. In diesen Speichern (21a), (21b) werden die Phasendifferenzen ( $\Delta_1$ ) und ( $\Delta_2$ ) für jeden Bildpunkt aufakkumuliert. Dies kann z. B. in einer Integer-Arithmetik so erfolgen, daß die 8 Bit Phasendifferenzen in einem Datenbereich von 16 Bit in den Speichern (22a), (22b) aufsummiert werden. Auf diese Weise ist es möglich, die aus 255 Bildern gewonnenen Phasendifferenzen zu mitteln und damit die Genauigkeit der Phasenmessung zu verbessern.

Die Ausgänge der Bildspeicher (21a, 21b) sind zwei darauffolgenden weiteren Recheneinheiten (22a, 22b) zugeführt, in denen über weitere Tabellen (look-up-tables) die Formeln zur Berechnung des Objektabstandes gemäß Gleichung (13) bereitgehalten sind. Diese Recheneinheiten (22a) berechnet aus der gemittelten langen Schwebung  $\Delta_1$  die Ordnung  $N_2$  in der kurzen Schwebung. Die Recheneinheit (22b) berechnet aus  $N_2 + \Delta_2$  die genauen z-Werte, die in einer darauffolgenden Rechenstufe (23) nochmals gemittelt werden. In einem darauffolgenden digitalen Signalprozessor (24) werden die Koordinaten (x) und (y) der Bildpunkte gemäß Gleichung (16) und (17) aus den Meßwerten für (z) und den vom Host-Rechner gelieferten Gerätekonzanten ( $x_k$ ), ( $y_k$ ) und ( $a_k$ ) berechnet und einer Ausgabeeinheit (25) zugeführt.

Mit der beschriebenen Methode wird die Höheninformation über das zu vermessende Objekt absolut gewonnen und nicht nur innerhalb einer Streifenphase.

Das vorstehend beschriebene Auswerteverfahren setzt voraus, daß die von der Kamera (K) gelieferten Signale im linearen Bereich der Kamerakennlinie erzeugt werden, daß insbesondere keine Unter- oder Übersteuerung vorkommt. Weiterhin ist es für das beschriebene Verfahren erforderlich, daß innerhalb einer Aufnahmeserie der von den Projektoren ( $P_1$ ,  $P_2$ ) projizierten Streifenmuster Phasenwerte nur dann weiterverarbeitet werden, wenn beide Phasenwerte für den bestimmten Bildpunkt gültig sind. Diese Rechenoperationen werden im Schaltungsteil (C) von Fig. 3a durchgeführt. Ob ein Meßwert gültig oder ungültig ist, wird in einem Bit des look-up-tables LUT in der Recheneinheit (15) abgefragt. Die "und" Verknüpfung über die drei Videobildsequenzen wird in der Rechenstufe (26) zusammen mit einem rekursiv geschalteten RAM-Baustein (27) erzeugt. In der anschließenden Rechenstufe (28) wird die Anzahl der gültigen Meßwerte an jedem Bildpunkt berechnet und in einem nachfolgenden RAM-Baustein (29) gespeichert. Unter der Anzahl der Meßwerte ist hierbei die Anzahl der Videobilder zu verstehen, über die die Phasendifferenzen im Summationseinheit (S) von Fig. 3b aufsummiert werden. Setzt man eine geeignet Mindestanzahl von gültigen Messungen für jeden Bildpunkt, dann werden all die Bildpunkte ausgeblendet, in denen zu wenige Messungen gültig waren; alle übrigen Bildpunkte werden in die Ergebnisberechnung einbezogen. Die hierdurch beschriebene, über die Bildpunkte gelegte Datenmaske ist durch das mit (30) bezeichnete Quadrat in Fig. 3a symbolisiert. Mit ihr kann der zur Ausgabe dienende Videomonitor (42) an den entsprechenden Bildpunktstellen dunkelgesteuert werden.

Der anhand von Fig. 3a und 3b beschriebene in Hardware realisierte Auswerterechner stellt eine Lösung dar, mit der die Signale der Kamera zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens verarbeitet werden können. Diese Lösung ist darauf zugeschnitten, daß die Streifenmuster durch die Projektoren ( $P_1$ ,  $P_2$ ) im Zeitmultiplex nacheinander projiziert und die Bilder dann von der Kamera (K) nacheinander aufgenommen und verarbeitet werden. Es ist jedoch auch möglich, die Streifenmuster beispielsweise in verschiedenen Farben gleichzeitig zu projizieren und mit zwei über Farbteiler getrennten Kameras gleichzeitig aufzunehmen. Dann müssen allerdings der Eingangskanal, d. h. der A/D-Wandler (12), die Konvolutionsbausteine (14a) und (14b), die Recheneinheiten (15) und (16), die im Zeitmultiplex arbeiten, parallel ausgeführt werden. Dies hat zwar höhere Kosten zur Folge, bietet jedoch auch eine größere Bandbreite in der Verarbeitungsfrequenz. Umgekehrt sind die beschriebenen Rechenoperationen auch auf einem passend programmierten, geeignet leistungsfähigen, sequentiell arbeitendem Rechner herkömmlicher Struktur ablauffähig, allerdings dort nur mit erheblich längeren Laufzeiten, so daß eine Echtzeitverarbeitung der Videosignale in diesem Falle nicht zu erzielen ist. Wenn man die Gitter in der Gitterebene quer zur Streifenrichtung verschiebt, was in der Fig. 2 durch den Pfeil (Pf) angedeutet ist, ändert das die Streifenphase an jedem Bildpunkt um den gleichen Betrag. Wenn man den Verschiebungsoffset als zusätzlichen Term in der Differenzbildung in Baustein (16) berücksichtigt, kann man die Mittelung über verschiedene Gitterstellungen ausführen. Dazu verschiebt der Motor (M) in Fig. 2 das Gitter zwischen den Messungen. Während der Messungen selbst ruhen die Gitter. Die Detektoren ( $H_1$  bis  $H_3$ ) mit einem kleinen Gegengitter (D) stellen zusammen mit dem unteren Randbereich des Projektionsgitters ( $G_2$ ) ein inkrementales Gittermeßsystem dar, mit dem die momentane Position des Gitters gemessen wird. Die von den Detektoren ( $H_1$  bis  $H_3$ ) gemessenen Lichtintensitäten werden an den in der Fig. 2 mit (C) gekennzeichneten Host-Rechner gegeben, der daraus die Stellung der Gitter berechnet. Anschließend schreibt der Host-Rechner die berechneten Phasenwerte der Gitterstellung als Offset in den Baustein (16) ein. In den Gleichungen (4) und (5) wird dieser Offset durch einen zusätzlichen Summanden im Nenner berücksichtigt. Es können nun mehrere Messungen mit verschiedenen Stellungen des Gitterträgers (W) gemacht werden, bei denen entsprechend auch unterschiedliche Bereiche der Gitter beleuchtet sind. Da die Einzelmessungen hinsichtlich der Phasendifferenzen ( $\Delta_i$ ) über alle Bilder aufaddiert und hierbei gemittelt werden, wirkt sich das so aus, daß statistische Fehler, aus den Fertigungsungenauigkeiten der Gitter oder aus der Phasenbestimmung selbst mit der Wurzel aus der Anzahl der Messungen verbessert wird.

Alternativ zu der gezeichneten Anordnung der Projektoren zur Kamera kann die Kamera auch zwischen den Projektoren, aber leicht aus der Mitte zwischen den Projektoren versetzt, angeordnet sein. Zwischen dem vom ersten Projektor projizierten Streifenmuster und dem Streifenmuster der Referenzmessung gibt es dann eine erste Schwebung, und zwischen dem Streifenmuster des zweiten Projektors und dem Streifenmuster der zugehörigen Referenzmessung eine zweite Schwebung beide Schwebungen sind geringfügig unterschiedlich. Die Differenz zwischen diesen beiden Schwebungen ist wieder eine lange Schwebung, die man heranzieht, die Ordnung innerhalb einer der beiden kurzen Schwebungen zu bestimmen. Die Ordnung und die Streifenphase ergeben dann zusammen einen z-Meßwert. In diesem Zusammenhang kann man auch die kurze Schwebung zwischen den beiden projizierten Gittern anstelle der Schwebung zwischen einem projizierten Muster und der Referenzmessung für die genaue z-Bestimmung verwenden.

Eine weitere alternative Anordnung sieht vor, daß beide Projektoren dicht nebeneinander angeordnet sind, und die Kamera in einem zum Abstand der Projektoren vergleichsweise großen Abstand davon. Auch hier ergibt sich bei Differenz zwischen den Streifenphasen des ersten Projektors und den Streifenphasen des zweiten Projektors eine Schwebung mit großer effektiver Wellenlänge, die eine grobe z-Bestimmung in einem großen Eindeutigkeitsbereich ermöglicht. Die Differenz zwischen den Streifenphasen eines Projektors mit den Streifenphasen eines rechnerisch gebildeten Gitters auf der Kamera oder mit den Streifenphasen einer Referenzmessung ergibt die kurze Schwebung, die zur genauen z-Bestimmung dient.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Messung von Objektoberflächen mit Hilfe von auf die Oberflächen projizierten Streifenmustern, die von einer Kamera aufgenommen und ausgewertet werden, wobei zur Vergrößerung des Meßbereichs in Richtung der Kameraachse (z) Strukturen mit unterschiedlicher Periodizität ausgewertet werden, mehrere Streifenmuster gleicher oder leicht voneinander abweichender Periode projiziert werden und mindestens zwei aus den Streifenmustern gewonnene Schwebungsfrequenzen mit unterschiedlicher effektiver Wellenlänge für die Auswertung herangezogen werden (nach europäischer Patentanmeldung 91 102 736.5), **dadurch gekennzeichnet**, daß zwei Streifenmuster projiziert werden, und daß mindestens eine Schwebungsfrequenz durch Bildung der Differenz zwischen den Streifenphasen ( $s_1$ ,  $s_2$ ) und in einem Speicher abgelegten Sollphasen ( $Ref_1$ ,  $Ref_2$ ) erzeugt wird, wobei die Sollphasen ( $Ref_1$ ,  $Ref_2$ ) in einem Bildpunkt auf der Kamera aus der Position des Bildpunktes, der Periodizität (P) der projizierten Gitter und geometrischen Gerätekonzstanten ( $a$ ,  $a_k$ ) berechnet sind.

2. Verfahren zur Vermessung von Objektoberflächen mit Hilfe von auf die Oberflächen projizierten Streifenmustern, die von einer Kamera aufgenommen und ausgewertet werden, wobei zur Vergrößerung des Meßbereichs in Richtung der Kameraachse (z) Strukturen mit unterschiedlicher Periodizität ausgewertet werden, mehrere Streifenmuster gleicher oder leicht voneinander abweichender Periode projiziert werden und mindestens zwei aus den Streifenmustern gewonnene Schwebungsfrequenzen mit unterschiedlicher effektiver Wellenlänge für die Auswertung herangezogen werden (nach europäischer Patentanmeldung 91 102 736.5), **dadurch gekennzeichnet**, daß zwei Streifenmuster projiziert werden und daß mindestens eine Schwebungsfrequenz durch Differenzbildung zwischen den Streifenphasen ( $s_1$ ,  $s_2$ ) und zugehörigen Referenzphasen ( $Ref_1$ ,  $Ref_2$ ) erzeugt wird, wobei die Referenzphasen aus den Meßwerten einer Referenzmessung und den zugehörigen Sollphasen berechnet werden.

3. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, daß beide Schwebungsfrequenzen durch Differenzbildung zwischen den Streifenphasen ( $s_1$ ,  $s_2$ ) und zugehörigen Sollphasen ( $Ref_1$ ,  $Ref_2$ ) erzeugt sind.

4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Referenzmessungen an Referenzflächen bekannter Geometrie durchgeführt werden.

5. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Referenzfläche eine ebene Fläche ist.

6. Vorrichtung zur Vermessung von Objektoberflächen nach einem der Verfahren der Ansprüche 1 bis 5, mit 2 Projektoren, die Streifenmuster gleicher Periodizität auf das Objekt (O) projizieren, eine Kamera (K) zur Aufzeichnung von Bildern der Objektoberfläche und einem der Kamera (K) nachgeschalteten Auswerterechner, der aus den Videosignalen der Kamera (K) die Höheninformation (z) für einzelne Punkte der Objektoberfläche berechnet, **dadurch gekennzeichnet**, daß ein Projektor ( $P_1$ ) nahe bei der Kamera (K) angeordnet ist, und der zweite Projektor ( $P_2$ ) einen Abstand ( $x_{op2}$ ) von der Kamera (K) hat, der wesentlich größer als der Abstand ( $x_{op1}$ ) des ersten Projektors ( $P_1$ ) von der Kamera (K) ist.

7. Vorrichtung zur Vermessung von Objektoberflächen nach einem der Verfahren der Ansprüche 1 bis 5, mit 2 Projektoren, die Streifenmuster gleicher Periodizität auf das Objekt (O) projizieren, einer Kamera (K) zur Aufzeichnung von Bildern der Objektoberfläche und einem der Kamera (K) nachgeschalteten Auswerterechner, der aus den Videosignalen der Kamera (K) die Höheninformation (z) für einzelne Punkte der Objektoberfläche berechnet, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Kamera (K) zwischen den beiden Projektoren ( $P_1$ ,  $P_2$ ) angeordnet ist, und daß der Abstand der Projektoren ( $P_1$ ,  $P_2$ ) von der Kamera (K) unterschiedlich ist.

8. Vorrichtung nach Anspruch 6 oder 7, **dadurch gekennzeichnet**, daß die zur Projektion dienenden Gitter ( $G_1$ ,  $G_2$ ) auf einem gemeinsamen Träger (W) angeordnet sind, der relativ zur Kamera (K) in der Ebene der Gitter ( $G_1$ ,  $G_2$ ) verschiebbar ist.

9. Vorrichtung nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet**, daß Mittel (D,  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$ ) zur Messung der Verschiebung des Trägers (W) vorgesehen sind.

10. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß eines der Gitter ( $G_1$ ,  $G_2$ ) gleichzeitig zur optischen Messung der Verschiebung des Trägers (W) relativ zur Kamera (K) dient.

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

- Leerseite -

FIG. 1

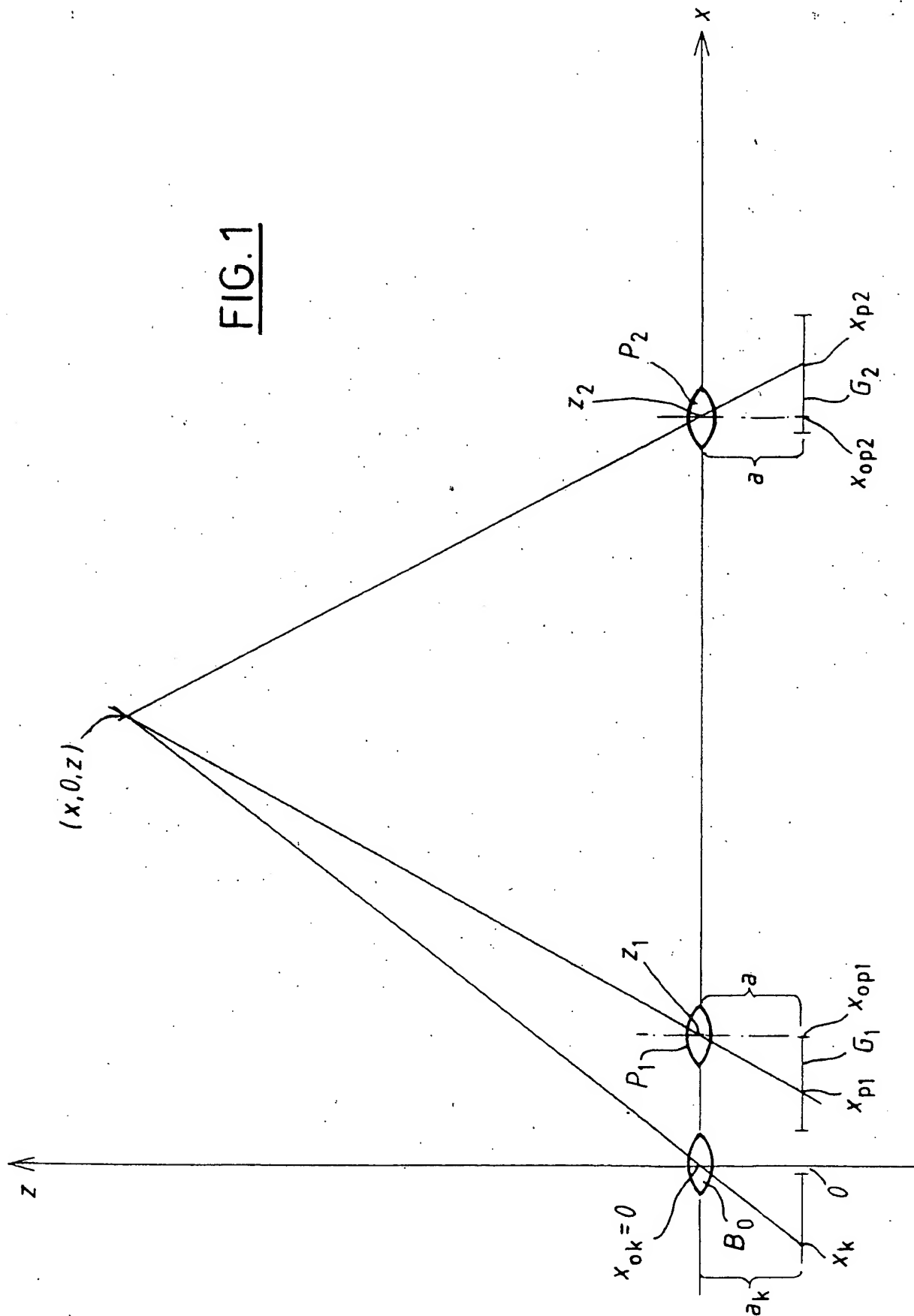


FIG. 2

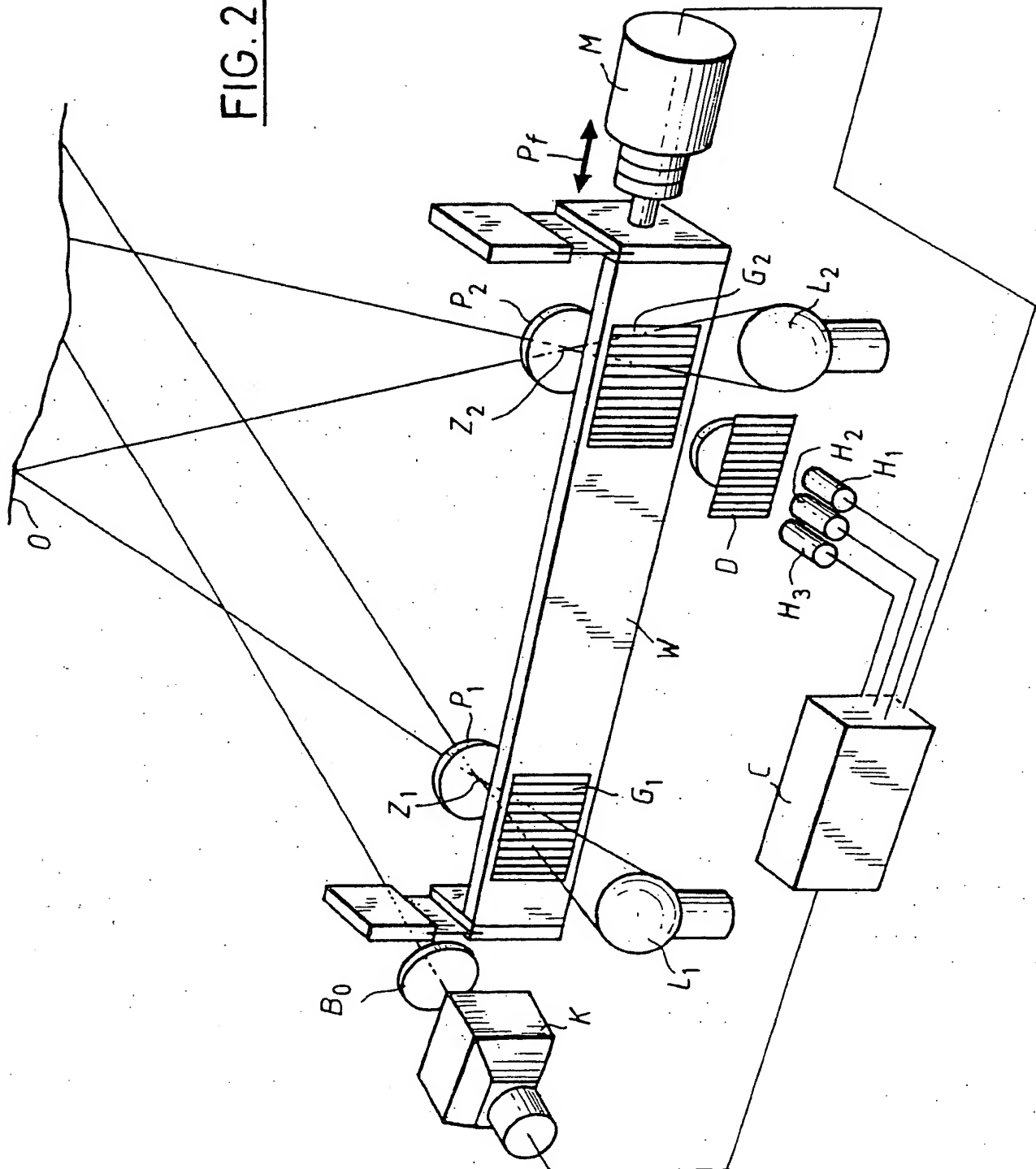


Fig. 3a

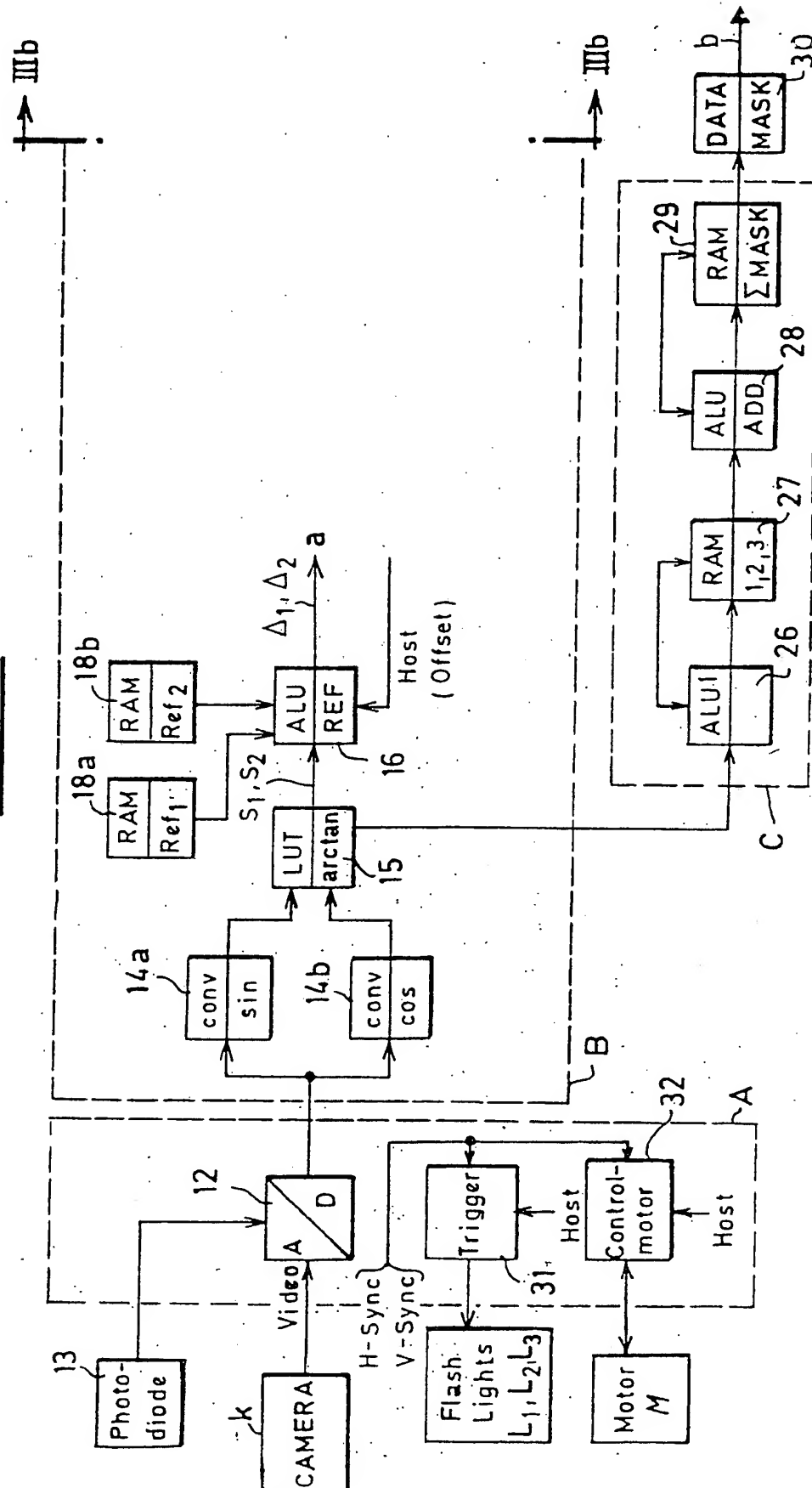


Fig. 3b

